sua concentração é, por (5.42), $p_{p0} \simeq N_a$. Por outro lado, na região $n$, de acordo com (5.38), $p_{n0} \simeq n_i^2/N_d$. Usando estes valores em (6.3) obtemos,

$$V_0 \simeq \frac{k_B T}{e} \ell\text{n} \frac{N_a N_d}{n_i^2} \quad . \tag{6.6}$$

Utilizando (5.25) podemos obter outra expressão para o potencial de contato,

$$V_0 \simeq \frac{E_g}{e} - \frac{k_B T}{e} \ell\text{n} \frac{N_c N_v}{N_a N_d} \quad . \tag{6.7}$$

Para uma junção de Ge com as mesmas concentrações de impurezas do Exemplo 6.1, pode-se mostrar que (Problema 6.1) $V_0 = 0{,}45$ V. Veja que a medida que as concentrações de impurezas aumentam, a segunda parcela da Eq.(6.7) diminui e $V_0$ se aproxima de $E_g/e$. Assim, os máximos valores do potencial de contato são 0,68 V em Ge e 1,12 V em Si.

**EXEMPLO 6.1**

Considere uma junção $p$-$n$ de Si, tendo concentrações de impurezas $N_d = 10^{16}\,\text{cm}^{-3}$ e $N_a = 10^{18}\,\text{cm}^{-3}$. Calcule o potencial de contato da junção em $T = 300\,\text{K}$.

Usando $k_B T = 0{,}026$ eV e os valores de $E_g$, $N_c$ e $N_v$ da Tabela 5.2, obtemos com a Eq.(6.7),

$$V_0 = 1{,}12 - 0{,}026\ \ell\text{n} \frac{2{,}6 \times 10^{19} \times 1{,}02 \times 10^{19}}{10^{18} \times 10^{16}}$$
$$= 1{,}12 - 0{,}026 \times 10{,}18 = 0{,}85\ \text{V} .$$

### 6.1.3 CARGA E CAMPO NA JUNÇÃO EM EQUILÍBRIO

O potencial de contato calculado na seção anterior é a diferença de potencial elétrico entre um ponto no lado $p$ e outro no lado $n$, ambos afastados da região da junção. Para calcular o campo elétrico é preciso obter a variação do potencial na região de carga espacial, que por sua vez depende da distribuição de cargas na região. Em vez de resolver o problema completo autoconsistentemente, vamos aproximar a distribuição de cargas por uma função simples e calcular o campo e o potencial a partir dela. Para obter esta distribuição vamos considerar o que acontece na região de carga espacial, ilustrada na Fig.6.4(a). Elétrons e buracos estão em trânsito permanente, passando de um lado da junção para outro. Alguns elétrons passam do lado $n$ para o lado $p$ por difusão, recombinam com buracos ou são "empurrados" de volta para o lado $n$ pelo campo elétrico. O mesmo acontece com buracos do outro lado. Como resultado, há poucos elétrons e buracos na região de carga espacial pois eles são varridos de lá pelo campo elétrico. Esta exaustão de cargas móveis da região de carga espacial faz com que esta região também seja chamada de depleção (vem do inglês *depletion*). Desta forma, as cargas da região são devidas aos íons das impurezas não compensadas, doadoras do lado $n$ e aceitadoras do lado $p$. Tendo as impurezas doadoras, com concentração $N_d$, perdido seus elétrons, sua carga é positiva. Por outro lado, as impurezas camadas de carga com as concentrações de impurezas e o potencial de contato. É fácil mostrar que,

$$V_0 = \frac{e}{2\epsilon} \frac{N_a N_d}{N_a + N_d} \ell^2 \quad , \tag{6.17}$$

de onde obtemos

$$\ell = \left[\frac{2\epsilon V_0}{e}\left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d}\right)\right]^{1/2} \quad . \tag{6.18}$$

Para obter uma expressão para a espessura $\ell$ em função apenas dos parâmetros dos semicondutores que formam a junção, substuímos (6.6) em (6.18), obtendo

$$\ell = \left[\frac{2\epsilon k_B T}{e^2}\left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d}\right) \ell\text{n}\frac{N_a N_d}{n_i^2}\right]^{1/2} \quad . \tag{6.19}$$

A partir desta expressão pode-se calcular as espessuras $\ell_p$ e $\ell_n$ das camadas de carga nos lados $p$ e $n$ através da Eq.(6.9).

Finalmente notamos que, como a diferença de potencial entre os dois lados é produzido por duas camadas de carga, a junção tem uma capacitância $C$. Sendo $A$ a área da seção reta da junção, as cargas totais nas camadas são $+Q$ e $-Q$, sendo $Q = eN_d\ \ell_n\ A$. No caso em que as cargas são distribuídas nas duas camadas, a capacitância é definida por $C = dQ/dV$. A partir de (6.9) e (6.18) obtemos então (Problema 6.5):

$$C = \frac{\epsilon A}{\ell} \tag{6.20}$$

onde $\ell$ é dado por (6.19). Vê-se que a capacitância da junção varia inversamente proporcional à espessura $\ell$ da região de carga espacial. Como veremos na próxima seção, $\ell$ pode ser alterado pela aplicação de uma tensão externa, o que permite então variar o valor de $C$.

### EXEMPLO 6.2

Considere uma junção $p$-$n$ de Si como a do Exemplo 6.1, tendo uma seção reta circular de diâmetro 200 $\mu$m. Calcule: a) A espessura da região de carga espacial; b) O campo elétrico máximo; c) A capacitância da junção.

a) Para calcular a espessura $\ell$, usamos a Eq.(6.18), com o valor da carga do elétron $e = 1{,}6 \times 10^{-19}$ C, a permissividade do vácuo $\epsilon_0 = 8{,}85 \times 10^{-12}$ Fm$^{-1}$.

Da Tabela 5.2 temos a constante dielétrica $\epsilon/\epsilon_0 = 11{,}8$, logo,

$$\ell = \left[\frac{2 \times 11{,}8 \times 8{,}85 \times 10^{-12} \times 0{,}85}{1{,}6 \times 10^{-19}}\left(\frac{1}{10^{18} \times 10^6} + \frac{1}{10^{16} \times 10^6}\right)\right]^{1/2}$$

$$\simeq \left(\frac{2 \times 11{,}8 \times 8{,}85 \times 10^{-12} \times 0{,}85}{1{,}6 \times 10^{-19} \times 10^{22}}\right)^{1/2} = 3{,}3 \times 10^{-7}\text{m} = 0{,}33\ \mu\text{m}$$

b) De (6.16) vem

$$\mathcal{E}_0 = \frac{2V_0}{\ell} = \frac{2 \times 0{,}85}{3{,}3 \times 10^{-7}} = 5{,}2 \times 10^6\ \text{V/m}$$

c) Para calcular a capacitância usamos (6.20) com a área $A = \pi R^2$, sendo $R = 10^{-4}$ m o raio da seção circular.

$$C = \frac{11{,}8 \times 8{,}85 \times 10^{-12} \times 3{,}14 \times 10^{-8}}{3{,}3 \times 10^{-7}} = 9{,}9 \times 10^{-12}\ \text{F} = 9{,}9\ \text{pF}.$$

## 6.2 CORRENTE NA JUNÇÃO POLARIZADA

Quando uma junção é polarizada, isto é, submetida a uma diferença de potencial de um circuito externo, o equilíbrio é alterado resultando numa corrente, cujo sentido depende da tensão aplicada. A característica essencial da junção *p-n* é sua assimetria em relação ao sentido de aplicação da tensão externa. Tensões em sentidos diferentes produzem correntes com intensidades diferentes. Isto pode ser compreendido examinando o efeito da tensão externa na barreira de potencial.

Quando uma tensão externa $V$ é aplicada nos terminais da junção, ela aparece quase inteiramente através da região de carga espacial. Isto ocorre porque a densidade de portadores nesta região é muito menor do que nas regiões neutras dos semicondutores e tem portanto resistência muito maior. Assim, a tensão externa soma-se ou subtrai-se do potencial $V_0$ da barreira em equilíbrio, dependendo de seu sentido, como ilustrado na Fig.6.5. Quando a tensão $V$ é aplicada no sentido do lado $p$ para o lado $n$, chamado **direto**, ela **diminui a barreira de potencial**, que passa a ter um valor $V_0 - V$ (Fig.6.5b). Por outro lado, se $V$ tem o sentido de $n$ para $p$, chamado **reverso, a barreira aumenta**, passando a ter um valor $V_0 + V$ (Fig.6.5c). O resultado é que a corrente que atravessa a junção quando a tensão é aplicada no sentido direto é maior que no sentido reverso, dando a junção *p-n* uma assimetria que é a base de operação dos diodos e dos transistores de junção.

**FIGURA 6.5** Efeito de tensão externa na espessura da região de carga espacial e na altura da barreira de potencial: (a) situação em equilíbrio; (b) polarização direta; (c) polarização reversa.